

수직압을 받는 트립강 보강패널의 극한거동

김경식*

¹교수, 청주대학교, 토목환경공학전공

Ultimate Behaviors of Stiffened Panel Built up with TWIP Steel Subjected to Perpendicular Pressure

Kim, Kyung Sik^{1*}

¹Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Cheongju University, Cheongju, 28503, Korea

Abstract - The TWIP steel has been recently developed as a high performance steel that has both high strength and elongation by the strain hardening capacity after yielding. This study investigates ultimate behaviors of stiffened panels built up with TWIP and conventional steels based on static and dynamic nonlinear finite element analysis schemes. In static ultimate strength analysis, the TWIP steel panels showed full capacity of resistance and rotation at boundaries so that and tensile failure occurred near central points of panels with maximum out-of-plane displacements while the conventional steel panels exhibited premature failure near boundaries due to yielding. A novel method for evaluating panel strengths due to dynamic loading in time domain has been suggested by utilizing stress degradation concept. The strength of TWIP steel panel was found to be 6 times more in static evaluation and 3 times more in dynamic evaluation than conventional steel panel.

Keywords - TWIP steel, Stiffened panel, Straining hardening, Ultimate strength, Static evaluation, Dynamic evaluation

1. 서론

최근 개발된 트립강(TWIP steel: twinning-induced plasticity steel)은 항복 직후부터 구현되는 변형률 경화 과정을 통해 매우 높은 수준의 극한강도와 연신율을 동시에 구현하는 고성능강재의 하나이다. 대변형률 능력으로 에너지 흡수능력이 탁월한 이 강재는 여러 산업영역에서 충격흡수 소재로 많이 활용되고 있다^{[1],[2]}. 소성변형 과정에서 나타나는 오스테나이트 쌍생(austenite twinning) 현상으로 인해 고강도와 연성을 동시에 갖게 되는 이 트립강은 1997년 Grässel *et al.*^[3] 이 트립강(TRIP steel: transportation-induced plasticity steel)의 재료적 성질을 연구하던 중 처음으로 명명된 것으로 알려져 있다^[4]. 트립강의 재료적 특징으로 항복강도는 400 MPa -

600 MPa, 인장강도는 1,400 MPa - 1,800 MPa, 극한변형률은 0.4 - 0.5 수준으로 일반 강재 또는 합금 강재에 비해 탁월한 변형률강화(strain hardening) 능력을 가진다. 대변형률 거동에 기인하여 실응력(true stress)과 공학응력(engineering stress)의 측정 차이가 크고, 재료 강도 시험 시 변형률속도(strain rate)에 따라 극한거동이 상이하게 나타나기도 한다^{[5]-[8]}. 이러한 높은 소성능력은 충격이나 폭발에 저항하는 방호 또는 방폭 구조물로 그 적용성을 확대해 나가고 있다^{[9],[10]}.

탄성 및 소성 영역을 거쳐 파단에 이를 때까지의 응력-변형률 곡선에서 항복이 구현되기 전까지 탄성영역 면적은 복원(resilience), 항복 이후 파단까지 소성영역 면적은 연성(ductility)으로 구분된다. 이 두 영역의 합이 인성(toughness)으로 정의되며 해당 재료의 에너지 흡수능력을 의미한다^[7]. Fig. 1은 전형적인 트립강의 한 종류인 Fe30Mn0.3C TWIP에 대한 Li *et al.*의 재료시험^[5]을 근간으로 실스케일의 응력-변형률 곡선을 보여준다. 탄성구간에서 기울기에 해당하는 탄성계수는 일반강재와 차이가 없어 항복강도가 275 MPa 일 경우 항복변형률은 0.134 % 수준이나, 극한변형률은 공학응력의 경우 85 %, 실응력의 경우 56 % 수준으로 항복변형률 대비 400배 이상을 보인다.

Note.-Discussion open until August 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 22, 2020; revised January 04, 2021; approved on January 05, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-229-8472 Fax. +82-43-229-8466

E-mail. kkim@cju.ac.kr

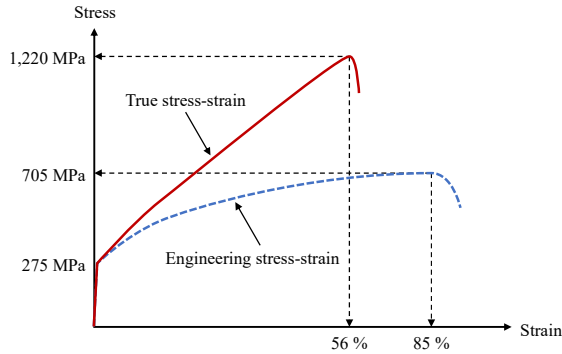


Fig. 1. Schematic scaled stress-strain curves for typical TWIP steel

강판(steel plate)과 보강재(stiffener)로 구성되는 보강판 시스템(stiffened plate system)은 조립이 용이하고 강중대비 높은 강성을 가지는 장점으로 해양구조, 항공구조, 및 건설 환경용 구조물에 다양하게 적용된다^{[11],[12]}. 본 연구에서는 항복후 연신율강화 능력과 극한강도가 탁월한 트립강을 방호방폭 구조물로 활용하는 방안으로 보강판 패널 시스템을 제안한다. 면에 수직인 방향(out-of-plane direction)으로 작용하는 압력하중을 대상으로 비선형 유한요소해석을 통해 트립강 보강패널의 정적 및 동적 거동을 분석하고 각각의 거동 영역에서 극한강도를 평가한다.

2. 정적해석 극한강도

제안된 보강판 패널 시스템은 보호대상 및 운반 가능성을 고려하여 한 변의 길이가 3 m인 정사각형 벽체 패널로 구성되었고, 패널의 네 변은 단순지지 조건으로 면내 방향에 대해서는 구속하였다. 판의 두께는 방호방폭 목적으로 후판을 적용한다는 가정하에 후판의 최소두께 6 mm로 설정되었고, 패널 한 면(one side)에 보강되는 일자형 보강재(flat-type stiffener) 또한 동일한 두께를 적용되었다.

본 연구의 극한강도 해석에서는 동급의 일반강 SM355와 비교를 위하여 항복강도가 Fig. 1에 보인 항복강도 275 MPa 급인 Li *et al.*의 트립강^[5]보다 다소 높은 Fe23.84Mn0.61C TWIP^[2]을 재료모델로 가정하였다. 이 재료의 항복강도와 극한강도는 실응력(true stress) 기준으로 각각 365 MPa, 1,365 MPa이다. 재료비선형 모델로서는 탄성구간뿐만 아니라 항복점 이후 변형률강화 구간도 직선으로 가정한 이중직선 모델(bi-linear model)로 응력-변형률 관계를 정의하였다. 극한강도에 도달하면 파단이 발생하며 이 때의 극한 소성변형률은 다소 안전측인 0.4로 가정하였다.

극한강도해석에 앞서 패널의 유한요소 모델의 민감도 시험(sensitivity test)을 위해 P4 판요소의 사이즈를 변화시키면서 수직압 재하에 따른 고유치해석(eigenvalue analysis)을 수행하였다. 수직 및 수평방향으로 등간격 3단에 걸쳐 폭 50 mm 보강재가 설치된 모델($n = 3$ 모델)의 좌굴강도의 변화를 Fig. 2에 보였다. 강도의 변화가 허용치(1%) 안에 드는 모델(80×80)을 본 연구에서 취하여 이후의 정적해석에 적용하였다.

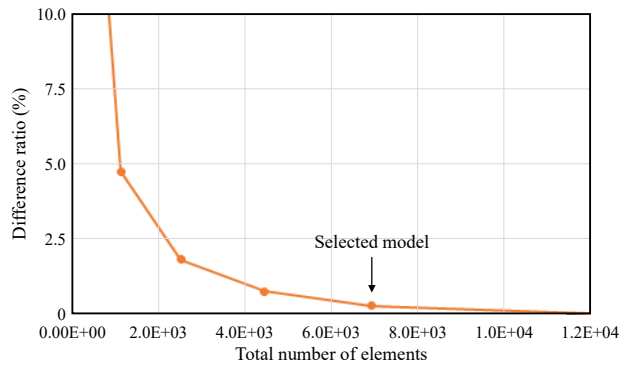
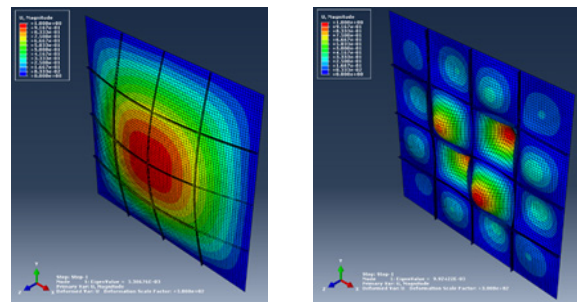


Fig. 2. Mesh test based on buckling strength analysis

Fig. 3은 좌굴해석에서 얻은 최초 모드형상을 보여준다. 보강재의 강성이 낮은 경우 전체좌굴모드(global buckling mode), 보강재 강성이 일정 이상을 확보하게 되면 국부좌굴 모드(local buckling mode)를 보이는데, 이는 면내 압축을 받는 경우의 거동과 유사하다고 할 수 있다^[11]. 그러나 이러한 선형좌굴거동에 기반한 고유치해석으로 실제 비선형적 거동에 기반하는 극한강도를 평가하기에는 한계가 있다.

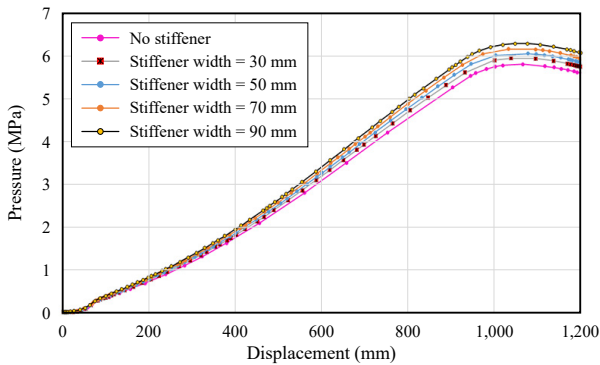


(a) Global mode (b) Local mode

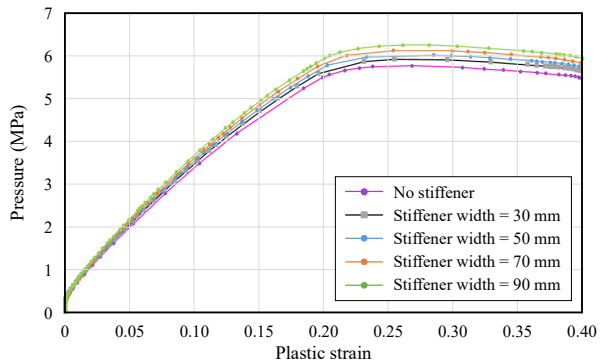
Fig. 3. Buckling modeshapes from eigenvalue analysis

트립강의 재료비선형성과 변형의 기하비선형성이 모두 고려된 패널의 극한강도 해석의 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 보였다. 수직 및 수평 방향으로 각각 3개의 일자형 보강재(flat-type stiffener)가 설치된, 즉 4×4개의 sub-panel을 가지는 패

널 모델에서 보강재의 강성에 따른 재하압력과 변위 관계를 Fig. 4(a)에서 보여준다. 여기서 변위는 패널의 중앙점에서 면외방향의 변위를 의미한다. 보강재는 판과 동일한 두께를 가지므로 보강패널의 면외 강성(out-of-plane rigidity)은 보강재의 폭에 비례하게 된다. 보강재의 국부좌굴을 방지하기 위해 그 폭을 최대 90 mm까지 고려해 해석을 수행하였고, 보강재가 없는 경우와 극한강도를 비교하였을 때 패널의 정적저항 능력은 8 % 수준까지 증가하는 것으로 평가되었다. Fig. 4(b)는 동일 해석에서 압력의 증가에 따른 중앙점에서 소성변형률(plastic strain)을 보여준다. 패널에 작용하는 정적압력이 극한강도에 도달했을 때 소성변형률은 0.25 수준으로 탄성변형률(elastic strain)과 합산인 최종변형률은 일반강의 연신률 0.18 수준을 훨씬 넘어서고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Applied pressure vs. out-of-plane displacement

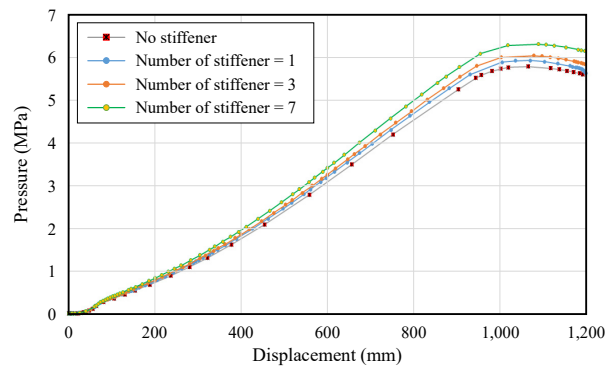


(b) Applied pressure vs. plastic strain

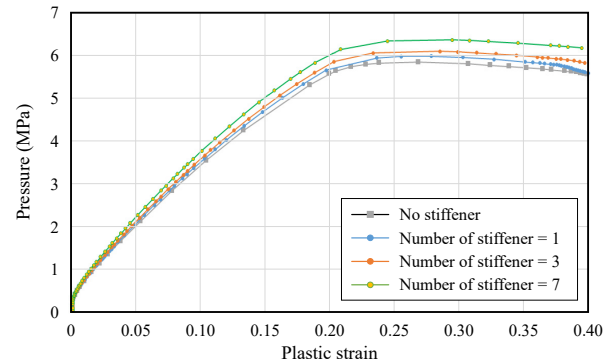
Fig. 4. Effect of width of stiffener on panel ultimate strength

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 수평 및 수직의 각 방향으로 설치된 보강재의 개수에 따른 패널 중앙점에서 면외 변위 및 소성변형률을 보여준다. 보강재 개수에 따른 극한강도 비교 목적의 이 해석에서 보강재는 공통으로 폭 70 mm를 사용하였고, 보강재 1단 설치의 경우 서브패널 개수는 2×2가 된다.

보강재의 설치 개수에 따른 극한강도의 차이는 무보강일 때와 비교하여 최대 8 % 수준으로 극한강도 향상을 보였다.



(a) Applied pressure vs. out-of-plane displacement



(b) Applied pressure vs. plastic strain

Fig. 5. Effect of number of stiffener in each lateral and vertical directions on panel ultimate strength

트립강과 일반강의 거동 비교를 위하여 강구조물에 널리 활용되는 SM355 강판으로 구성된 패널의 극한강도 해석을 수행하였다. SM355 강판의 재료모델과 사용된 물리상수는 Table 1과 Fig. 6에 보였다. 트립강 및 일반강으로 보강재 폭 70 mm 3단 설치된 패널 모델들에 대한 극한강도 해석결과를 Figs. 7-8에 비교하여 보였다. 각 모델의 면에 작용하는 수직압의 증가에 따른 중앙점에서 면외 변위를 Fig. 7에 보였는데, 트립강의 경우 최대저항값, 즉 극한강도가 6 MPa에 이르렀으나 일반강의 경우 1 MPa에 미치지 못하고 있음이 확인된다. 정적강도의 경우 그 비율은 6배 이상이 됨을 알 수 있다.

Table 1. Property values in Fig. 6

E (GPa)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_y	ϵ_{sh}	ϵ_u	E_{sh} (GPa)
205	355	490	0.00178	0.021	0.0585	3.6

수직압을 받는 트립강 보강패널의 극한거동

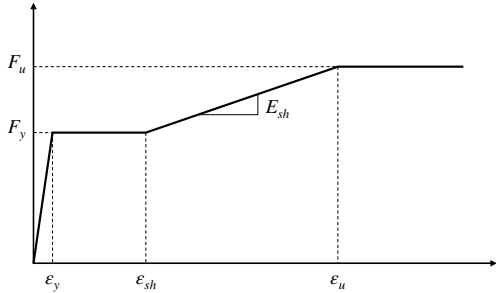


Fig. 6. Stress-strain relationship of conventional steel SM355

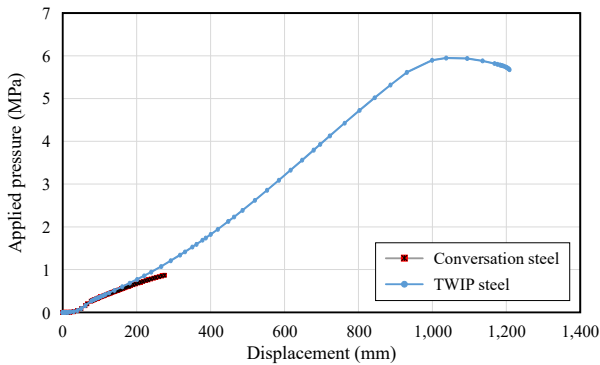


Fig. 7. Ultimate strength comparison of TWIP and conventional steel panel models

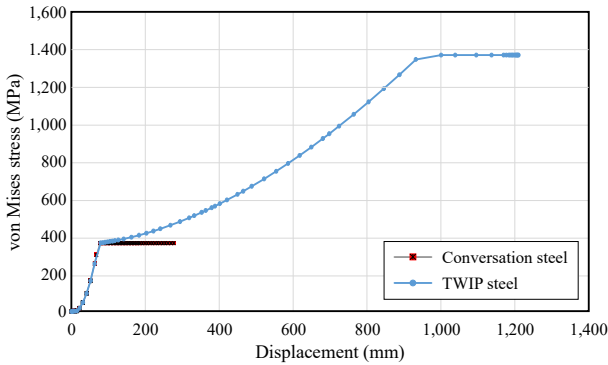


Fig. 8. Comparison of von Mises stress of TWIP and conventional steel panel models

3축 응력상태에 있는 재료의 항복의 상태를 확인하는 지표로서 다음과 같이 텐서 성분(tensor component)으로 정의 되는 폰 마이세스 응력(von Mises stress)이 사용될 수 있다.

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

Fig. 8에서는 트립강 및 일반강 모델에 대한 von Mises 응력의 변화를 보여준다. 일반강의 경우 항복후 재료의 응력경화(strain hardening)이 구현되기 이전에 패널 시스템은 극한

상태에 도달했음을 알 수 있다. 트립강의 경우, Fig. 6에서 $\epsilon_y - \epsilon_{sh}$ 구간, 즉 완전소성구간 없이 항복 이후 즉각적인 응력경화 현상이 구현되어 항복 이후라도 von Mises 응력은 재료의 인장강도 직전까지 증가함이 Fig. 8에서 관찰된다. 극한강도에 도달했을 때 각 패널의 면내 최대주변형률(maximum principal strain)의 분포와 변형형상을 실스케일(magnification factor = 1.0)로 Fig. 9에 보였다. Fig. 9(a)에서 확인되듯이, 일반강 패널의 경우 경계면 주변이 먼저 항복에 도달하고 패널의 전체에 작용하는 수직압의 증가에 추가로 저항하지 못하여 마치 창문틀에서 창문이 통째로 빠져나가는 듯한 거동을 보인다. 이에 반하여 트립강의 경우 Fig. 9(b)에서 확인되듯이 경계면에서 저항과 회전이 충분히 이루어지고 추가 수직압에 대해 대변위 소성변형으로 저항하므로 종국적으로 패널의 중앙점에서 최대 면외 변위가 발생하게 되고 그에 상응하는 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 파괴모드는 다음 절에서 제시되는 동적해석을 통해서도 추가로 확인되었다.

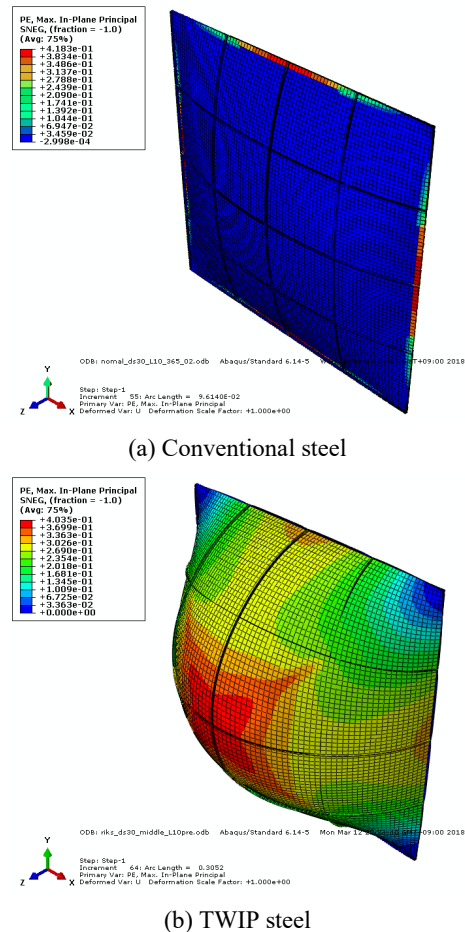


Fig. 9. Comparison of deformed shapes at ultimate stage of TWIP and conventional steel panel system

3. 동적해석 극한강도

방호 또는 방폭 구조물로서 트립강 패널의 극한 성능을 평가하기 위해 본 절에서는 앞서 정적해석에 적용된 재료 및 기하 비선형성이 포함된 비선형 동적해석을 시간영역(time domain)에서 수행하였다. 동적해석에 사용된 시간영역 동적하중은 Fig. 10에 보인 바와 같이 지속시간 0.2초의 펄스 하중과 지속시간 1.0초의 연속충격하중 두 가지를 고려하였다. 펄스 또는 충격하중의 재하패턴과 지속시간은 매우 다양하지만 본 연구에서는 특수목적의 고성능강 트립강의 내충격 성능을 일반강과 비교하기 위함은 목적으로 Fig. 9와 같이 전형적인 패턴이 가정되었다.

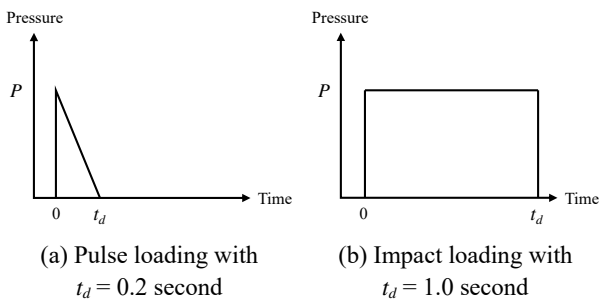


Fig. 10. Loading in time domain

정적해석에서 극한강도는 비록 많은 수의 반복 평형검토 과정을 거치지만, 한 번의 비선형 하중증분해석으로 얻을 수

있다. 즉, 작용하중보다 작은 초기하중값(initial load value)을 입력하여 최초 평형을 구한 후 증분을 통해 재하하중을 단계적으로 증가시키면서 평형을 찾는 반복과정을 통해 최대 저항능력이 발현되는 지점까지 찾으면 그 값이 정적해석의 극한강도가 된다. 그러나 동적해석에서 어떤 패널시스템의 극한강도를 결정하기 위해서는 비선형 하중증분해석 일체가 반복적으로 수행되어야 한다. Fig. 10에 보인 입력하중 패턴에서 하중 P 값은 해석의 입력변수가 된다. 어떤 특정값의 P 가 입력되어 해석후 패널시스템이 파괴에 도달하지 않았다면 그 P 값은 극한강도 이하의 값을 알 수 있다. 그 다음 해석에서 P 값을 증가시켜 동적해석을 수행하는데, 이러한 반복적 해석은 그 패널시스템이 파괴에 이를 때에 멈추게 된다. 그 때의 하중 크기는 극한강도를 상회하였다고 볼 수 있으므로 다음 해석은 P 값을 낮추어 다시 해석을 수행해야 한다. 결과적으로 극한강도는 이러한 반복해석 단계에서 파괴되지 않은 단계의 P 값과 파괴된 단계의 P 값 사이에 존재하게 되므로 종국적 극한강도는 허용치 안에서 반복해석을 통해 결정될 수 있다. 이러한 반복과정을 통한 극한강도는 하중 P 에 대한 증분을 통해 Newton-Raphson iteration^[11]의 개념으로 결정될 수 있다. 본 연구에서 적용된 반복해석을 통한 극한강도의 결정 방식을 Fig. 11에 흐름도로 나타내었다. 흐름도에 보인 하중강도(load intensity)는 Fig. 10의 펄스 또는 연속충격하중의 P 값에 해당한다. 반복해석을 중단하게 되는 허용치(tolerance)는 이전 해석결과의 1%로 가정하였다.

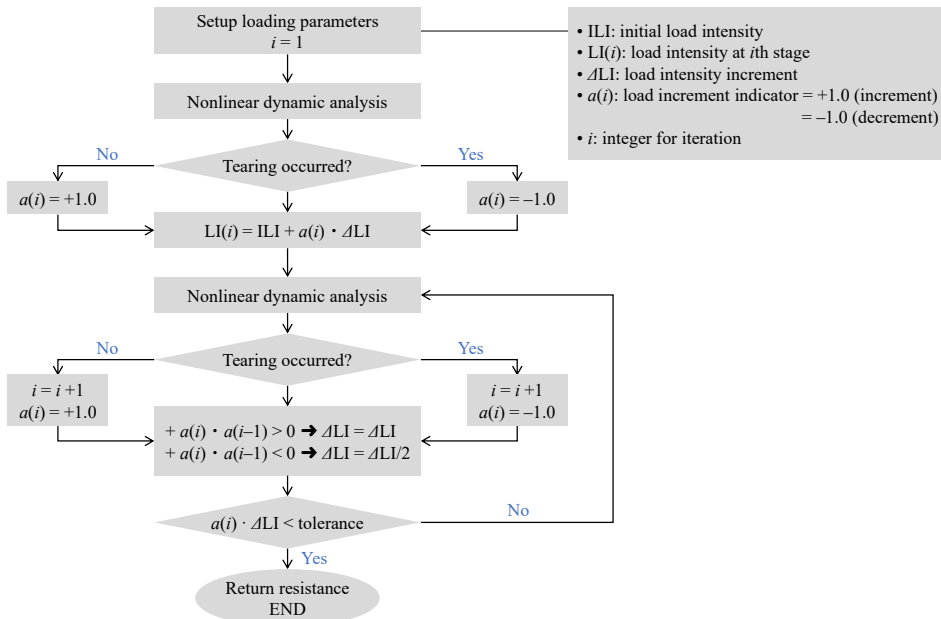


Fig. 11. Flowchart for ultimate resistance evaluation in iterated dynamic analysis

Fig. 11에 보인 방식으로 극한강도를 결정하기 위해서는 패널 시스템의 동적파괴에 대한 정의를 명확히 해야 한다. 본 연구에서 제안된 패널 시스템은 면에 수직인 방향으로 펄스 또는 충격압을 받으므로 파괴모드는 앞서 정적강도해석에서 보인 바와 같이 인장파괴를 보인다. 이에 본 연구에서는 해석모델의 어떤 요소가 인장파괴에 이르러 면내에서 최초로 찢어짐(tearing)이 발생되었다면 이때의 충격압을 극한강도로 정의하였다. 면요소의 찢어짐을 구현하기 위하여 인장을 받는 패널의 어떤 요소가 3차원 소성 주변형률(plastic principal strain in 3-dimension)의 값이 TWIP강의 경우 0.4, 일반강의 경우 0.18에 도달할 경우 찢어짐(tearing)의 메커니즘이 시작된다고 가정하였다. 이후 시스템의 평형 경로(equilibrium path)를 통해 해당 요소는 응력이 0(zero)으로 떨어지게 되는 응력퇴화(stress degradation)를 겪게 된다. Fig. 12는 요소에서 발생하는 응력-변형률의 변화과정을 보여주는 데 c점이 응력퇴화의 시발점이 된다. 응력퇴화가 촉발된 해당요소는 종극적으로 구조계에서 제거되는 효과를 가지게 되어 정적 저항능력은 소실된다. 그러나 이때에도 시간영역 동적해석에서는 관성력은 작용하게 되므로 파단된 요소가 구조계에서 떨어져 나가는 효과를 구현하게 된다. 이러한 기능은 유한요소프로그램 Abaqus^[14]에서 제공되는 요소제거(element elimination) 기능을 활용하였다.

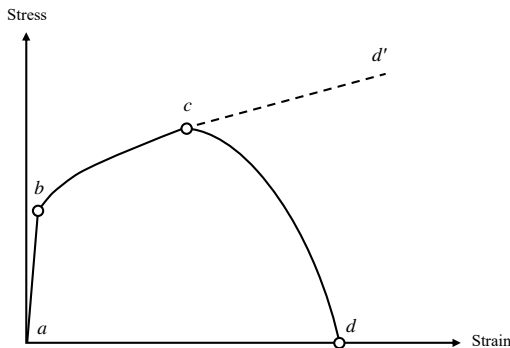


Fig. 12. Stress degradation in element

재료 및 기하 비선형성이 고려된 시간영역 동적해석에서 극한강도를 결정하는 유한요소해석의 경우 대상 모델의 요소개수에 따른 민감도가 달라 그 결과가 다소 차이를 보일 수 있다^[13]. 본 해석 대상 모델의 요소수에 따른 민감도를 확인하기 위하여 정사각형 패널의 한 변에 대한 요소 개수를 40개, 80개, 160개, 320개로 증가시키며 동적극한강도해석을 실시하였다. 그 저항강도를 펄스하중의 경우 Fig. 13에, 충격하중의 경우 Fig. 14에 보였다. Figs. 13-14에서 확인할

수 있듯이 요소수가 증가할수록 그 극한저항강도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 요한요소해석이 근거하고 있는 최소 에너지의 법칙(principle of minimum potential energy)에 부합한다고 볼 수 있다^[13]. 지속충격하중을 받는 TWIP강의 경우 그 정도가 미미하여 요소수에 대한 민감도는 높지 않은 것으로 나타났다. Figs. 13-14에서 파악된 강도 변화경향으로 보아 한 변 320개의 요소라면 충분한 정도(precision)의 극한강도가 확보된 것으로 보인다.

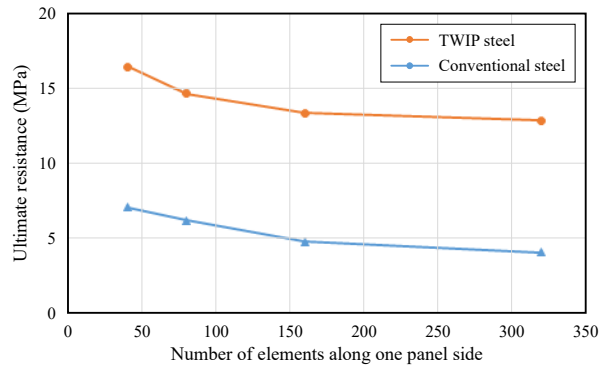


Fig. 13. Ultimate resistance of panel model in case of pulse

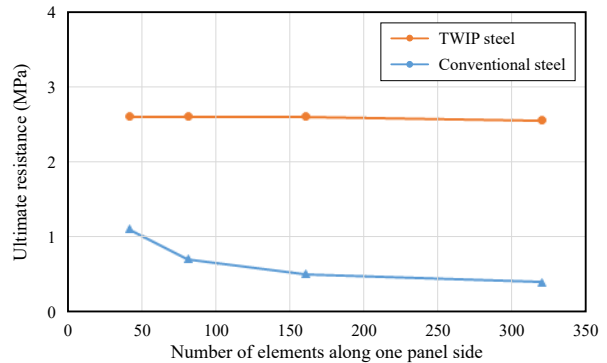
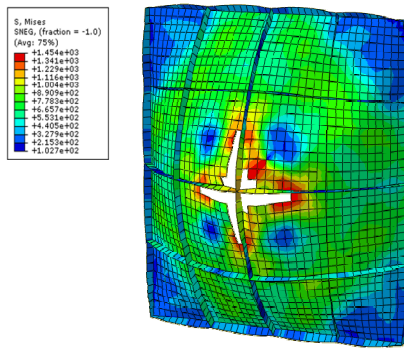


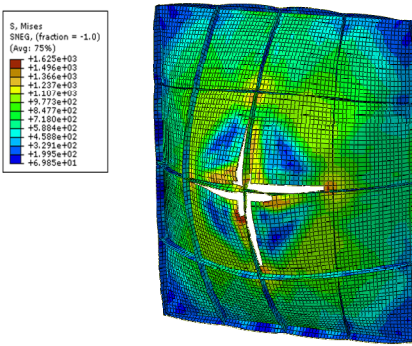
Fig. 14. Ultimate resistance of panel model in case of impact

동적해석 결과를 요약하여 TWIP강과 일반강의 극한저항능력을 비교적으로 보여주는 Figs. 13-14로부터, 일반강 대비 TWIP강은 펄스하중의 경우 3.2배, 충격하중의 경우 11.5배 수준의 높은 극한저항강도를 확인할 수 있다.

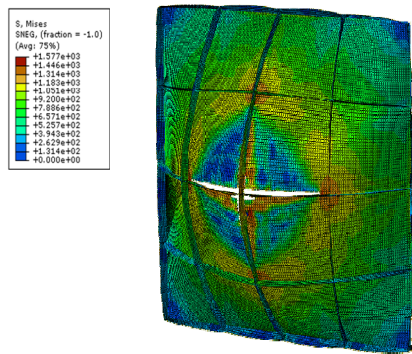
Figs. 15-16에는 TWIP강 및 일반강 유한요소모델의 요소개수에 따른 파괴모드를 보여준다. Fig 15에서 보인 TWIP강의 경우 지지경계면에서 충분한 저항이 이루어져 패널의 중앙부 판과 보강재 경계면에서 파단이 발생함을 알 수 있다. 앞서 정적해석에서 언급하였듯이 Fig. 16에 보인 일반강의 경우 4개 지지면에서 먼저 파단이 발생하여 창틀에서 창문이 빠져나가는 형상과 유사한 모드를 보인다.



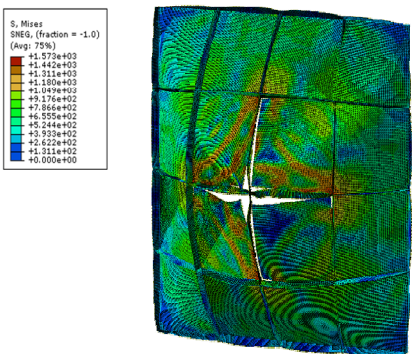
(a) Number of element per edge = 40



(b) Number of element per edge = 80

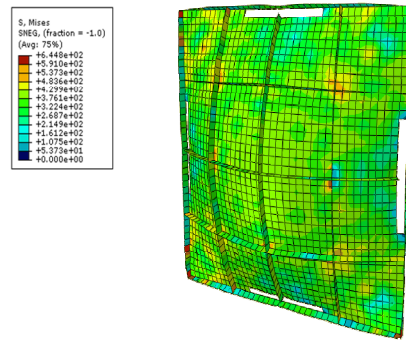


(c) Number of element per edge = 160

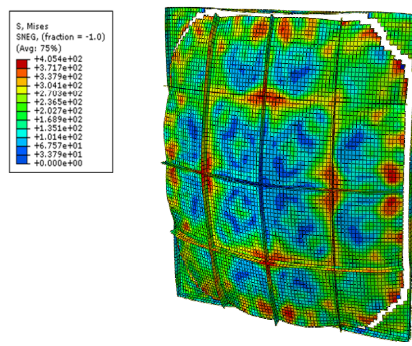


(d) Number of element per edge = 320

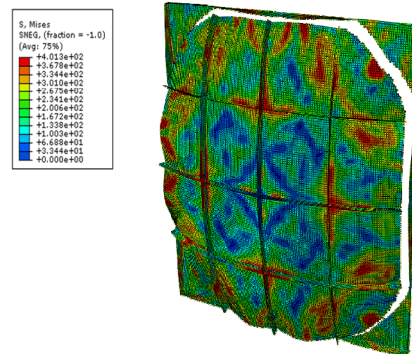
Fig. 15. Failure modes of TWIP steel panels



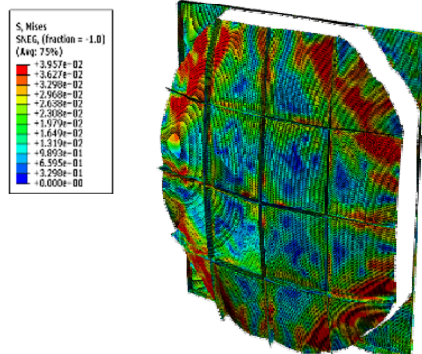
(a) Number of element per edge = 40



(b) Number of element per edge = 80



(c) Number of element per edge = 160



(d) Number of element per edge = 320

Fig. 16. Failure modes of conventional steel panel

4. 결론

이 연구에서는 항복 이후 지속적인 변형률경화 특성을 가지는 TWIP강을 방호구조물 적용 목적의 보강판으로 모델하여 정적해석 및 동적해석을 통해 극한거동을 분석하였고, 펄스 및 충격하중을 면에 수직으로 재하하여 극한 저항능력을 평가하였다.

일반강 패널의 경우 패널면 전체에 작용하는 수직압에 의해 경계면 주변이 먼저 항복에 도달하여 패널이 경계면에서 이탈하는 파괴모드를 보였고, 트립강 패널의 경우 경계면에서 저항과 회전이 충분하여 패널 중앙점에서 최대 면의 변위가 발생하면서 인장파괴를 보였다. TWIP강의 정적 극한강도는 일반강 대비 6배 이상을 구현하였다.

시간영역 동적해석을 통한 TWIP강의 극한저항강도를 산정하는 기법을 정립하였고 펄스 및 충격하중을 받는 동적해석 극한강도해석을 수행하였다. 일반강 대비 TWIP강은 펄스하중의 경우 3배 이상, 지속충격하중의 경우 11배 이상의 수준으로 높은 극한저항강도를 구현할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2019~2020학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

참고문헌(References)

[1] Habibi, N., Zarei-Hanzaki, A., and Abedi, H.-R. (2015) An Investigation into the Fracture Mechanisms of Twinning-Induced-Plasticity Steel Sheets Under Various Strain Paths, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, Vol.224, pp.102-116.

[2] Li, Y., Zhu, L., Liu, Y., Wei, Y., Wu, Y., Tang, D., and Mi, Z. (2013) On the Strain Hardening and Texture Evolution in High Manganese Steels: Experiments and Numerical Investigation, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Elsevier, Vol.61, No.12, pp. 2588-2504.

[3] Grässel, O., Frommeyer, G., Derder, C., and Hofmann, H. (1997) Phase Transformations and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-Steels, *Journal de Physique IV Colloque*, Les Ulis, Vol.7, No.C5, pp.383-388.

[4] Dan, W.J., Liu, F., and Zhang, W.G. (2014) Mechanical Behavior Prediction of TWIP Steel in Plastic Deformation, *Computational Materials Science*, Elsevier, Vol. 94, pp.114-121.

[5] Li, K., Yu, B., Misra, R.D.K., Han, G., Tsai, Y.T., Shao, C.W., Shang, C.J., Yang, J.R., and Zhang, Z.F. (2019) Strain Rate Dependence on the Evolution of Microstructure and Deformation Mechanism During Nanoscale Deformation in Low Carbon-High Mn TWIP Steel, *Materials Science & Engineering: A*, Elsevier, Vol.742, pp.116-123.

[6] Kang, J.-H., Ingendahl, T., and Bleck, W. (2016) A Constitutive Model for the Tensile Behaviour of TWIP Steels: Composition and Temperature Dependencies, *Materials & Design*, Elsevier, Vol.90, pp.340-349.

[7] Joo, G., and Huh, H. (2018) Rate-Dependent Isotropic-Kinematic Hardening Model in Tension-Compression of TRIP and TWIP Steel Sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, Vol.146-147, pp.432-444.

[8] Sun, C.Y., Guo, N., Fu, M.W., and Wang, S.W. (2016) Modeling of Slip, Twinning and Transformation Induced Plastic Deformation for TWIP Steel Based on Crystal Plasticity, *International Journal of Plasticity*, Elsevier, Vol.76, pp.186-212.

[9] Kim, K., and Kim, Y. (2018) Ultimate Strengths of Stiffened Panels of TWIP Steel Subjected to Perpendicular Pressure Loading, *Proceedings of the 5th International Conference on Protective Structures*, International Association of Protective Structures, Poland, pp.206-211.

[10] Kim, K. (2019) Ultimate Behaviors of Stiffened Panels Built-up with High Performance Steel Capable of Extremely Large Strain-Hardening, *Proceedings of the 10th International Symposium on Steel Structures*, KSSC, Korea, pp.485-486.

[11] Kim, K.S. (2019) In-Plane Compressive Strength of Hybrid Steel Stiffened Plate with Single Stiffener, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.1, pp.65-73 (in Korean).

[12] Yoon, D.Y., and Kim, K.S. (2007) A Study on Flexural Ductility of Longitudinally Stiffened Plate Girders, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.643-653 (in Korean).

[13] Bathe, K.-J. (1996) *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Inc., USA.

[14] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2017) *Abaqus/CAE User's Guide*, DSS, USA.

요 약 : 최근 고성능강의 일종으로 변형률경화에 의해 강도와 연신율이 탁월한 트립강이 개발되었다. 이 연구에서는 트립강과 일반강으로 조립된 보강패널에 대하여 정적 및 동적 비선형유한요소해석에 근간하여 극한거동을 평가하였다. 정적강도해석에서 일반강패널은 경계면에서 파괴가 발생하였으나, 트립강 보강패널은 경계면에서 충분한 저항과 회전능력을 보였고 중심부에서 최대 면외변위를 발생시키며 인장파괴모드를 보였다. 시간영역에서 정의되는 동적하중에 대한 패널의 극한저항강도를 평가하는 기법을 응력퇴화 개념을 통해 제안하였다. TWIP 강재 패널은 일반강 패널 대비 정적 평가에서 6배 이상, 동적 평가에서 3배 이상의 극한 저항강도를 보였다.

핵심용어 : 트립강, 보강패널, 응력경화, 극한강도, 정적평가, 동적평가
